

Dans le HEMT conventionnel, les niveaux d'énergie du puits quantique triangulaire, formé dans la couche de GaN sous l'interface AlGaIn/GaN, sont situés, à l'équilibre, au-dessous du niveau de Fermi. Sous une tension de polarisation nulle, le canal est donc fortement peuplé en électrons, ce qui fait du HEMT un composant normalement passant (« normally-on »). Toutefois, pour les applications de commutation de puissance, la fonctionnalité « normally-off » des interrupteurs est fortement requise [3]. Afin d'atteindre cette fonctionnalité, les niveaux d'énergie doivent donc être élevés au-dessus du niveau de Fermi. Plusieurs structures ont été proposées pour la réalisation de HEMTs en AlGaIn/GaN normally-off. On peut citer les HEMT à « recess gate » [4], à traitement aux ions fluor [5], à jonction pn [6], à barrière fine d'AlGaIn [7], avec AlN/GaN [8] et avec couche barrière d'InGaIn [9]. Dans le HEMT normally-off rapporté dans [5], les ions de fluor sont implantés dans la couche d'AlGaIn. Lorsque cette approche est utilisée, une petite quantité d'ions fluor pénètre dans le canal formé à l'interface AlGaIn/GaN, devenant ainsi des impuretés qui conduisent à la dégradation de la mobilité [10]. Dans cet article, nous proposons d'implanter les ions fluor non pas dans l'AlGaIn mais dans la couche de

GaN, sous l'interface AlGaIn/GaN et sous l'électrode de grille. De cette façon, le problème des ions fluor pénétrant dans le canal devrait disparaître car les ions sont ici implantés sous le canal.

2. Résultats de simulations

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé ATLAS de la société SILVACO, un outil de simulation à éléments finis axé sur la physique des composants semi-conducteurs. Les modèles physiques utilisés dans le simulateur comprennent la recombinaison de Shockley-Read Hall, la statistique de Fermi-Dirac et la mobilité dépendant du champ électrique [11]. Le simulateur a été étalonné à l'aide d'un composant conventionnel réalisé dans le cadre d'un ancien projet, un HEMT normally-on (Figure 1-a). La Figure 1-b montre le bon accord entre les caractéristiques de transfert simulées et mesurées, les deux courbes affichant quasiment les mêmes valeurs de seuil, transconductance et courant de fuite.

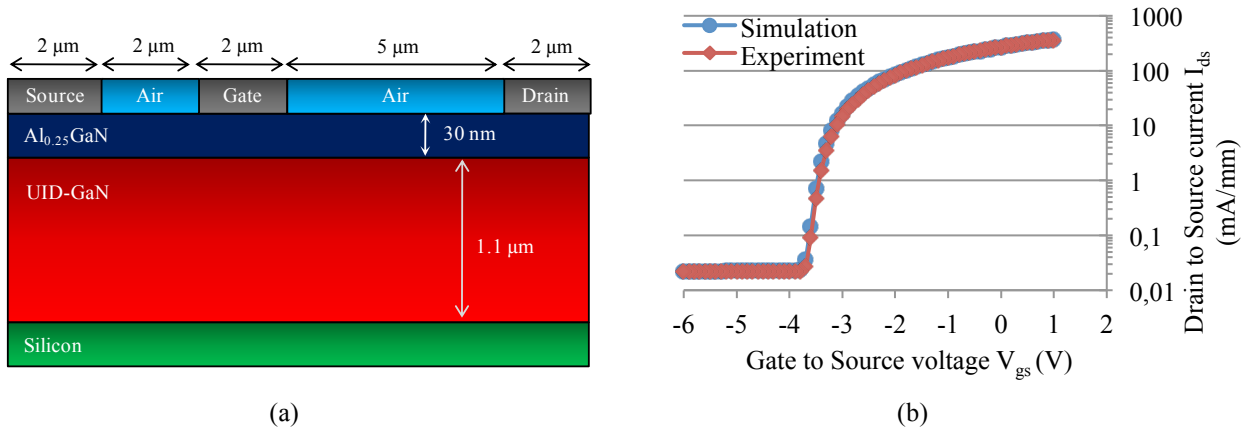


Figure 1 : a) Coupe schématique du HEMT normally-on utilisé pour l'étalonnage du simulateur, b) Comparaison des caractéristiques de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ mesurées et simulées.

2.1 Implantation de fluor dans la couche d'AlGaIn

La Figure 2-b montre les caractéristiques de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ du HEMT conventionnel ("Null") et de HEMTs avec du fluor implanté dans l'AlGaIn (Figure 2-a), ceci pour différentes concentrations d'ions fluor implantés (de $4 \cdot 10^{12}$ à $1,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$). La distance entre les ions fluor et l'interface AlGaIn/GaN a été prise égale à 15 nm.

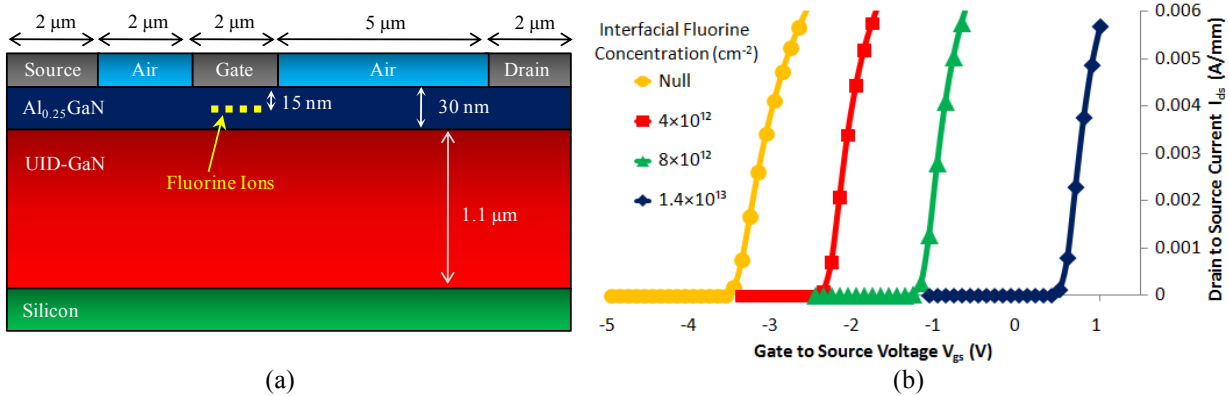


Figure 2 : (a) Coupe schématique de la structure HEMT simulée avec du fluor implanté dans la couche d'AlGaIn. (b) Caractéristiques de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ correspondantes pour différentes concentrations de fluor.

Il apparaît clairement que, à partir d'une certaine concentration en fluor, cette technique est capable de déplacer la tension de seuil vers des valeurs positives ($V_{th} = +0,5 \text{ V}$ pour une concentration de $1,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), rendant le HEMT normally-off. Ces simulations confirment les résultats publiés dans [5].

2.2 Implantation de fluor dans la couche de GaN

La Figure 3-b montre les caractéristiques de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ du HEMT conventionnel ("Null") et de HEMTs avec du fluor implanté dans la couche de GaN non-intentionnellement dopée (Figure 3-a), ceci pour différentes concentrations d'ions fluor implantés (de $4 \cdot 10^{12}$ à $8 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$). Ici aussi, la distance entre les ions fluor et l'interface AlGaIn/GaN a été

prise égale à 15 nm. Lorsque la concentration de fluor augmente, la tension de seuil augmente jusqu'à des valeurs positives ($V_{th} = +0,5$ V pour une concentration de 8.10^{12} cm^{-2}), confirmant que cette technique permet également d'obtenir la fonctionnalité « normally-off » pour les HEMTs.

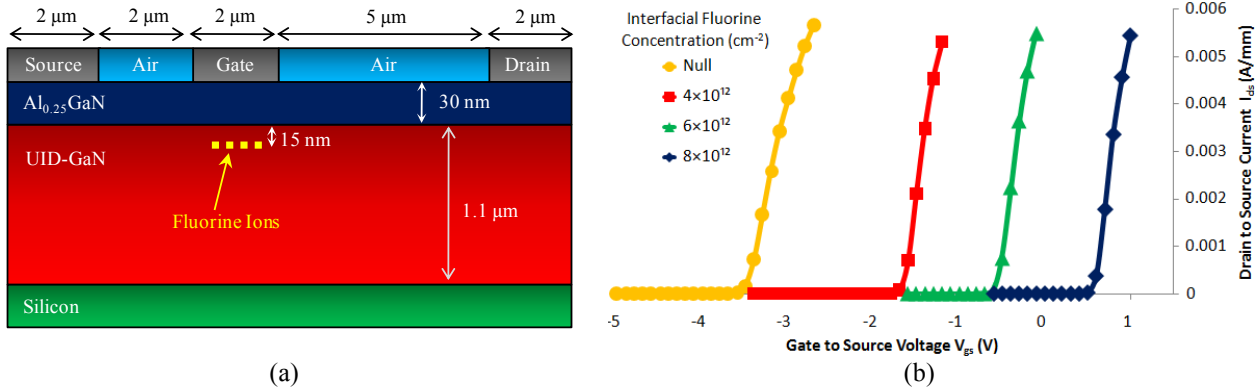


Figure 3 : (a) Coupe schématique de la nouvelle structure HEMT simulée, avec du fluor implanté dans la couche de GaN. (b) Caractéristiques de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ correspondantes pour différentes concentrations de fluor.

2.3 Comparaison des deux approches

Il est intéressant de souligner que, bien que la même tension de seuil de 0,5 V a été atteinte dans les deux cas après implantation, la concentration de fluor nécessaire pour atteindre cette valeur est de 8.10^{12} cm^{-2} lorsque le fluor est implanté dans la couche de GaN alors qu'elle est égale à $1,4.10^{13}$ cm^{-2} quand le fluor est implanté dans l' AlGaIn . Cela tendrait à montrer que la solution proposée ici est plus efficace puisqu'elle nécessite une concentration en fluor moins élevée pour obtenir la même tension de seuil.

Pour essayer de mieux comprendre les différences entre les deux solutions proposées, les diagrammes de bandes pour les deux structures sont présentés sur la Figure 4, dans le cas où elles affichent la même tension de seuil (0,5 V). On peut conclure de cette figure que l'implantation d'ions fluor dans le GaN est plus efficace : les HEMTs utilisant ici des grilles à contact Schottky, les bandes de conduction dans la partie supérieure de la couche d' AlGaIn sont limitées à une énergie fixe égale à la valeur de la barrière Schottky. Cela a une influence sur la structure HEMT avec fluor implanté dans l' AlGaIn puisque, sans cette limitation, la bande de conduction dans l' AlGaIn aurait pu atteindre des énergies plus élevées et, dans ce cas, le HEMT aurait pu afficher des tensions de seuil supérieures. En outre, il convient de noter que le confinement du gaz bidimensionnel sous la grille est supérieur dans le cas du fluor implanté dans le GaN (cf zoom dans la Figure 4).

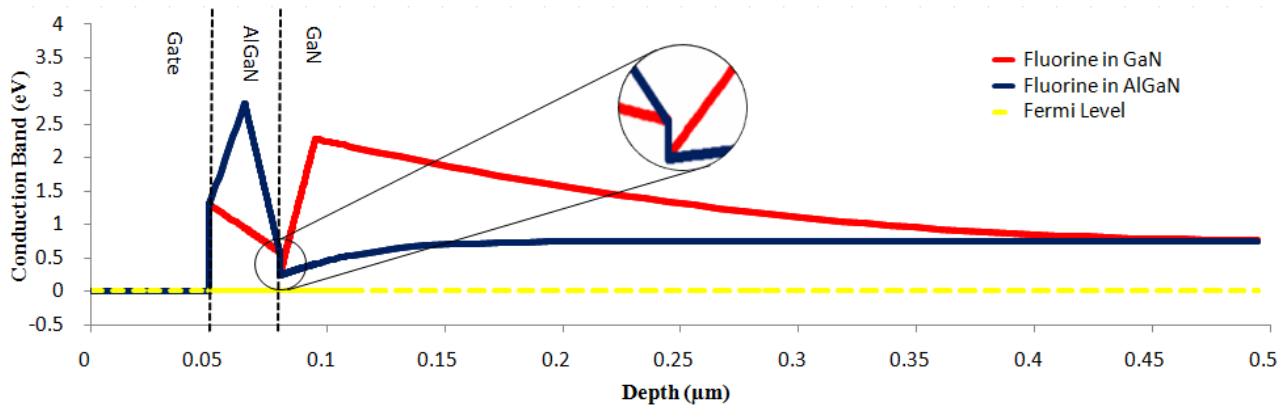


Figure 4 : Comparaison des diagrammes de bandes de deux HEMT affichant la même tension de seuil (0,5 V) : HEMT avec du fluor implanté dans l' AlGaIn (concentration $1,4.10^{13}$ cm^{-2} — bande de conduction bleue —) et HEMT avec du fluor implanté dans le GaN (concentration 8.10^{12} cm^{-2} — bande de conduction rouge —).

3. Conclusion

Dans ce travail, dans le but de concevoir un interrupteur HEMT normally-off, nous suggérons l'implantation d'ions fluor dans la couche de GaN, sous l'interface AlGaIn/GaN , uniquement sous l'électrode de grille, plutôt que l'implantation de ces mêmes ions dans la couche d' AlGaIn , comme précédemment proposé dans d'autres publications. À l'aide de

simulations numériques à éléments finis, nous avons montré que cette approche permettait également d'obtenir des tensions de seuil positives. En outre, cette nouvelle technique semble plus efficace puisque la concentration en ions fluors requise pour obtenir la fonctionnalité « normally-off » est plus faible ($8 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ pour le fluor implanté dans le GaN contre $1,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ pour le fluor implanté dans l'AlGaN). Enfin, la solution proposée devrait permettre d'éviter la pénétration d'ions fluor dans le canal d'électrons puisque le fluor est implanté sous le canal.

4. Références

- [1] H. Chen, J. Wang, Ch. Xu, M. Yu, Y. Fu, Z. Dong, F. Xu, Y. Hao, and C.P. Wen, « Enhanced device performance of AlGaN/GaN HEMTs using thermal oxidation of electron-beam deposited Aluminum for gate oxide », *9th Int. Conf. on Solid-State and Integrated-Circuit Technology*, 20-23 Oct. 2008 (Beijing, Chine)
- [2] U.K. Mishra, P. Parikh, and Y. WU, « AlGaN/GaN HEMTs-an overview of device operation and applications », *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, no. 6, pp. 1022 - 1031, 2002
- [3] H. Kambayashi, Y. Satoh, T. Kokawa, N. Ikeda, T. Nomura, and S. Kato, « High field-effect mobility normally-off AlGaN / GaN hybrid MOS-HFET on Si substrate by selective area growth technique », *Solid-State Electronics*, Vol. 56, no. 1, pp.163–167, 2011
- [4] S.D. Burnham, K. Boutros, P. Hashimoto, C. Butler, D. W.S. Wong, M. Hu, and M. Micovic, « Gate-recessed normally-off GaN-on- Si HEMT using a new O₂-BCl₃ digital etching technique », *Phys. Status Solidi C*, Vol. 7, no. 7, pp. 2010-2012, 2010
- [5] H. Chen, M. Wang, and K. J. Chen, « Self-aligned Enhancement-mode AlGaN/GaN HEMTs Using 25 keV Fluorine Ion Implantation », *Device Research Conference (DRC)*, 21-23 Juin 2010, (USA)
- [6] X. Hu, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, R. Gaska, and M.S. Shur, « Enhancement Mode AlGaN/GaN HFET with Selectively Grown pn Junction Gate », *Electronics Letters*, Vol.36, no. 8, pp. 753-754 , 2000
- [7] Y. Ohmaki, M. Tanimoto, S. Akamatsu, and T. Mukai, « Enhancement-Mode AlGaN/AlN/GaN High Electron Mobility Transistor with Low On-State Resistance and High Breakdown Voltage », *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, no. 44, pp. L1168–L1170, 2006
- [8] M. Higashiwaki, T. Mimura, and T. Matsui, « Enhancement-Mode AlN/GaN HFETs Using Cat-CVD SiN », *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 54, no. 6, pp. 1566-1570, 2007
- [9] T. Mizutani, M. Ito, S. Kishimoto, and F. Nakamura, « AlGaN/GaN HEMTs With Thin InGaN Cap Layer for Normally Off Operation », *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 28, no. 7, pp. 549-551, 2007
- [10] K.J. Chen, L. Yuan, M. J. Wang, H. Chen, S. Huang, Q. Zhou, C. Zhou, B. K. Li, and J. N. Wang, « Physics of Fluorine Plasma Ion Implantation for GaN Normally-off HEMT Technology », *Electron Devices Meeting (IEDM)*, 5-7 Décembre 2011 (USA)
- [11] ATLAS, User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE, SILVACO, Inc., Santa Clara, CA, 2011, pp. 330-331.